

Кравець В.Г., д.т.н., проф.,  
Ган А.Л., к.т.н., доц.,  
Шукюров А.о.М., асп.,  
Бовкунович М.А., студ.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

## РОЗВИТОК СИЛОВОГО ПОЛЯ В СИСТЕМІ СУМІЖНИХ СВЕРДЛОВИННИХ ЗАРЯДІВ

Kravets V., Dr. Eng. Sc., Prof.,  
Han A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.,  
Shukiurov A., Ph.D. student,  
Bovkunovych M., student  
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

## DEVELOPMENT OF FORCE FIELD IN THE SYSTEM OF COMBINED CHARGES IN THE WELL

*Метою роботи є дослідження формування силового поля в міжзарядному просторі від взаємодії двох суміжних свердловинних зарядів.*

*Розглянуто вплив торцевих частин суміжних зарядів на формування силового поля в області набійки при одночасній дії вибухових імпульсів з метою отримання максимального механічного ефекту.*

*Виконано аналітичні дослідження закономірностей формування сумарного поля напружень в межах взаємодії двох суміжних свердловинних зарядів обмеженої довжини за умови їх одночасного ініціювання. Особливу увагу приділено послідовності розвитку силового поля в часі між зарядами та в крайових ділянках зарядів – на рівні перебуру та на контакті з набійкою. Складено алгоритм розрахунку, оснований на моделюванні подовжених зарядів рівновеликими гірляндами зосереджених зарядів. Розглянуто систему з двох суміжних подовжених зарядів, ініційованих в нижній частині. Детонаційний фронт переміщується в напрямку набійки та випромінює в середовище хвилю напружень. Фронт генерованого вибухом поля напружень поширюється в модельному середовищі відносно під кутом до осі заряду, який залежить від співвідношення швидкостей детонаційної та пружної хвиль в модельному середовищі. Враховано, що зустрічні похилі силові фронти взаємодіють вздовж середньої оскової лінії, паралельної зарядам, яка ділить масив між суміжними зарядами навпіл. З отриманої діаграми розвитку тиску встановлено, що сумарне поле напружень вздовж серединної осі симетрії між зарядами, ініційованими з нижнього торця, втрачає частину енергії на початковій ділянці поля, на рівні перебуру, але підсилюється на кінцевій ділянці, на контакті з набійкою. Запропоновано компенсувати втрату енергії в нижній частині поля шляхом застосування потужних бойовиків, які одночасно здатні генерувати зустрічні хвильові фронти, за якими відбуваються висхідні зрушення породних мас. Ці зрушення є новим елементом технології комбінованого висадження «вертикальний клин», який передбачає ведення масового вибуху укрупненими групами з декількох одночасно висаджуваних рядів зарядів, а сповільнення встановлюються між цими групами.*

**Ключові слова:** поле напружень, суміжні заряди, перебуру, набійка, силовий фронт, втрати енергії, бойовик, масові зрушення

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Теорія і практика вибухової справи значне місце серед ефективних методів управління механічним ефектом вибуху відводить формуванню геометрії і інтенсивності потоку енергії вибуху окремого свердловинного заряду в процесі його ініціювання, тобто початковій стадії формування силового поля. У комплексі таких основних чинників, як інтенсивність, спрямованість дії і послідовність взаємодії енергетичних потоків в системі «проміжний бойовик – заряд – гірський масив» перші два практично повністю пов'язані зі стадією ініціювання. Вони в значній мірі визначають розвиток сумарного механічного ефекту вибуху і кінцевий його результат. Класичні теоретичні рішення з динаміки вибуху розглядають свердловинний заряд нескінченно довгим, щоб уникнути складнощів опису механізму розвитку процесу в торцевих частинах реального заряду кінцевої довжини. Однак саме на цих ділянках заряду відбувається деградація силового поля, що замість циліндричної симетрії набуває сферичної форми з втратою значної частини енергії. Емпіричні методики будуються на узагальненні дослідних даних, рекомендуючи раціональні конструктивні рішення, одночасно виключаючи необхідність пояснення крайових ефектів, що виникають. Крайові ефекти присутні в подовженому заряді обмежених розмірів, проявляючись в торцевих його частинах у вигляді зміни симетрії процесу. Вони пов'язані також з енергією, формою, місцем розташування в свердловинному заряді проміжного ініціатора, який зумовлює напрямки розвитку поля напружень і закономірності взаємодії силових полів в системі зарядів. Подібні емпіричні методики, вирішуючи завдання в області підшви уступу, в області набійки і в міжзарядному цілику, вимагають практичного уточнення в конкретних умовах висаджування. В статті виконано спробу на основі аналітичних розрахунків встановити основні закономірності у формуванні крайових ефектів силового поля від вибуху взаємодіючих суміжних подовжених зарядів обмеженої довжини та розглянути на цій основі дієві і прийнятні на практиці методи регулювання параметрами такого поля переважно в його крайових зонах.

**Аналіз стану досліджень.** Як слідує з теоретичних досліджень [1] та інженерних розрахунків [2] закономірностей формування силового поля навколо окремого подовженого заряду обмеженої довжини, в крайових зонах рівень напружень в силовому полі суттєво спадає через зростання дисипативних втрат енергії, викликане переходом циліндричної симетрії поля напружень навпроти основної частини заряду в сферичну на його торцях. Явище деградації силового поля негативно відбивається на механічному ефекті з обох торців лінійного заряду, особливо при його обмеженій довжині.

В донній частині свердловинного заряду механічний ефект вибуху пропонується регулювати нижнім ініціюванням потужного бойовика з одночасним наданням йому конічної форми, здатного орієнтувати домінуючі енергетичні потоки в заданому напрямку [3]. Щодо верхнього торця свердловинного заряду, який відповідає за механічний ефект над зарядом в області набійки, можливості управління крайовим ефектом вибуху обмежені, оскільки слід зважати на небезпеку підсиленого розкидання окремих кусків породи. Відповідно параметри розташування свердловинних зарядів на уступі, орієнтуючись на чинник розкидання, в першу чергу забезпечують достатньою енергією лише нижню і центральну частини руйнованого уступу.

Цей факт підтверджується ґрунтовними теоретичними дослідженнями камуфлетної дії вибуху у верхній кінцевій частині свердловинного заряду обмеженої довжини [4, 5]. Автори, виконавши теоретичні побудови та комп'ютерні розрахунки параметрів і об'ємів камуфлетної фази вибуху, перенесли їх на реальні умови підривання

свердловинного заряду тротилу діаметром 250 мм в граніті з довжиною набійки 6 м. В результаті встановлено, що порода подрібнюється в зоні камуфлету до відмітки 0,625 м від верхнього торця заряду, далі до відмітки 3,4 м від торця заряду розвивається система тріщин, а в шарі вище 3,4 м і до поверхні (6 м від торця заряду) хвильова фаза породи не руйнує. Висловлено думку, що на дію поля напружень має накладатись квазістатична складова за рахунок переміщення породних шарів. Однак ця фаза залишилась не дослідженою. Крім того, торцевий ефект у верхній зоні уступу недостатньо характеризувати дією окремого свердловинного заряду.

**Постановка завдання** – розглянути, як на формування силового поля в області набійки вплине взаємодія торцевих частин суміжних зарядів. Важливою умовою такої взаємодії є одночасність дії імпульсів, за якої від суміжних зарядів створюються найбільш сприятливі умови для їх складання і відповідно умови для досягнення максимального механічного ефекту.

### ОСНОВНА ЧАСТИНА

За аналогією з методикою моделювання подовженого заряду гірляндою зосереджених зарядів [2], розглянуто закономірності формування силового поля від одночасного вибуху суміжних подовжених зарядів кінцевої довжини за їх нижнього ініціювання. В основу розрахунків параметрів силового поля закладено експериментальну залежність  $\sigma(R)$ , яка для зосередженого заряду має вигляд:

$$\sigma_{max} = K \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\mu$$

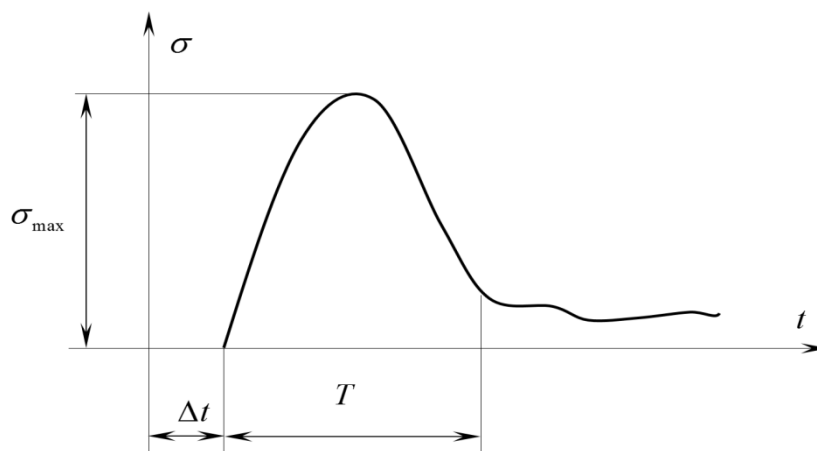
На відміну від вибуху зосередженого заряду вибух подовженого заряду характеризується іншою послідовністю в динаміці розвитку силового поля. Процес починається з поширення детонаційного фронту в кожному заряді з швидкістю  $C$ . Після виходу процесу на межу з породою формується фронт хвилі напружень в масиві між суміжними зарядами, який переміщується з швидкістю  $V$ . В реальних умовах процес ініціюється в нижньому торці заряду і поширюється як вздовж заряду в осьовому напрямку, так і в радіальному напрямку, швидко виходячи за межі заряду в середовище. На основі аналізу робіт [6 – 8], присвячених динаміці формування силових полів вибуху, прийнято загальний вигляд імпульсу напруження в точці  $A$  гірського масиву (рис. 1). В координатах « $\sigma - t$ » цей імпульс в задану точку масиву приходить від проміжного детонатора (бойовика) з певною часовою затримкою  $\Delta t$ , яка складається з часу проходження детонаційного фронту по заряду і часу розповсюдження вибухової хвилі від заряду гірським масивом до цієї точки. Враховуючи наведене, загальний вигляд імпульсу хвилі напружень:

$$\sigma = 5\sigma_{max} \sin\left(\frac{t - \Delta t}{T} \pi\right) e^{-10^3(t - \Delta t)} \quad (1)$$

де  $\sigma_{max}$  – максимальне значення напружень;  $t$  – час від початку процесу ініціювання заряду;  $T$  – період активної дії хвилі.

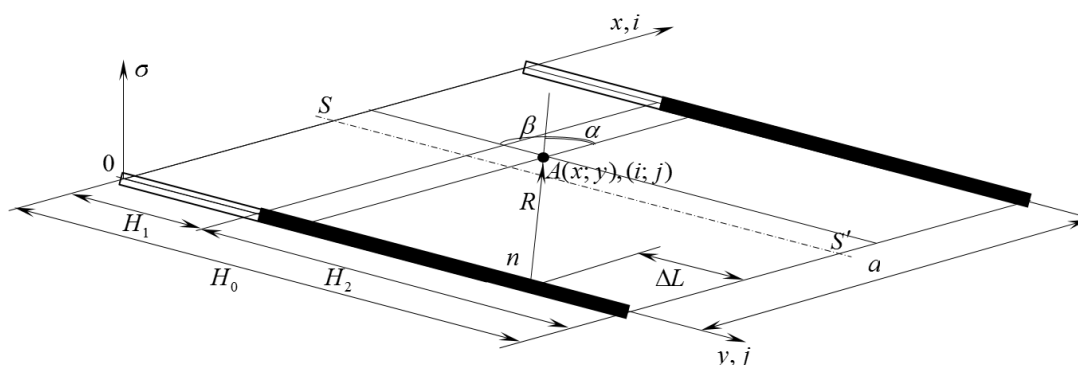
Для отримання уявлення про особливості закономірностей розвитку силового поля від вибуху суміжних подовжених зарядів у крайових зонах, що відповідають областям перебуру і набійки, розглянемо схему взаємодії двох свердловинних зарядів довжиною  $H_0$  (рис. 2) у будь – якому умовно обраному середовищі. Умовні параметри середовища та заряду: висота уступу  $H_0 = 10\text{ м}$ , довжина заряду  $H_2 = 7\text{ м}$ , висота набійки  $H_1 = 3\text{ м}$ ,

відстань між зарядами  $a = 3\text{ м}$ , лінійна маса заряду  $Q = 3,9\text{ кг}/\text{м}$ , коефіцієнти  $k = 60$ ,  $m = 20$ ,  $K = 4,5 \cdot 10^5$ ,  $\mu = 3,3$ ,  $c = 5500\text{ м}/\text{с}$ ,  $v = 3000\text{ м}/\text{с}$ ).



**Рисунок 1 – Характер розвитку епюри напруження в часі**

Для визначення сумарного тиску в масиві від суміжних зарядів розглянуто схему взаємодії двох свердловинних зарядів довжиною  $H_0$  (рис. 2).



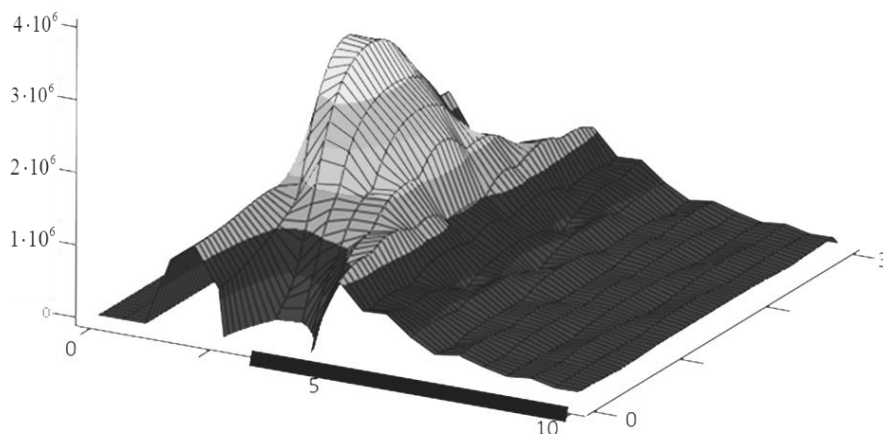
**Рисунок 2 – Схема до розрахунку сумарного тиску від дії двох суміжних зарядів на осі симетрії**

На рис. 3 представлено приклад розподілу сумарних нормальних тисків у площині між зарядами, визначених за системою рівнянь [7] при різних значеннях часу. Дані розрахунків на рис. 3 стосуються області між зарядами, обмеженої параметром  $H_2$ , позначеним на осі  $Y$  діапазоном значень глибини від 3 м до 10 м, та розраховані для т.А, розташованої на однаковій відстані від обох суміжних зарядів, тобто на серединній осі симетрії  $S-S'$  або  $Y$  ( $a/2$ ). На наведених діаграмах верхні торці обох свердловинних зарядів фіксуються на позначці 3 м, нижні – на позначці 10 м. Ініціювання зарядів виконується від нижнього торця зарядів. Детонаційний процес закінчується в області вище верхнього торця зарядів на позначці 3 м. Таким чином, розрахунками охоплено всю зону дії свердловинного заряду, включаючи міжзарядну область та особливо торцеві зони.

Аналіз наведених діаграм розподілу поля напружень в часі і просторі за умови взаємодії суміжних свердловинних зарядів в режимі нижнього одночасного ініціювання свідчить, що інтенсивність напружень на рівні між

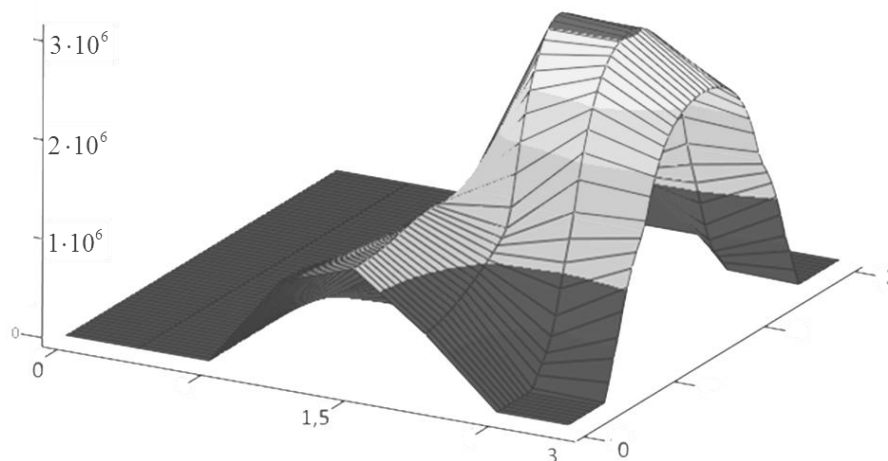
зарядами майже на порядок вища порівняно з напруженнями в породному шарі вище від верхніх торців зарядів, тобто на рівні набійки.

Для дослідження особливостей формування силового поля в шарі масиву на рівні набійки та порівняння їх рівня з аналогічними діаграмами в міжзарядному просторі побудовано відповідні діаграми тисків (рис. 4) окремо для породного шару на рівні набійки в діапазоні глибини 0...3 м від поверхні.



**Рисунок 3 – Приклад розрахунку сумарних напружень між суміжними зарядми на рівні торців в момент 0,002 с після ініціювання суміжних зарядів**

Приклад розрахунку наведено на рис. 3. Відповідно графіки рис. 4 стосуються більш пізніх за часом епізодів, коли детонація суміжних зарядів завершується і лише продовжується поширення зустрічних силових полів на верхню (над торцями суміжних зарядів) область масиву, обмежену по висоті набійкою.

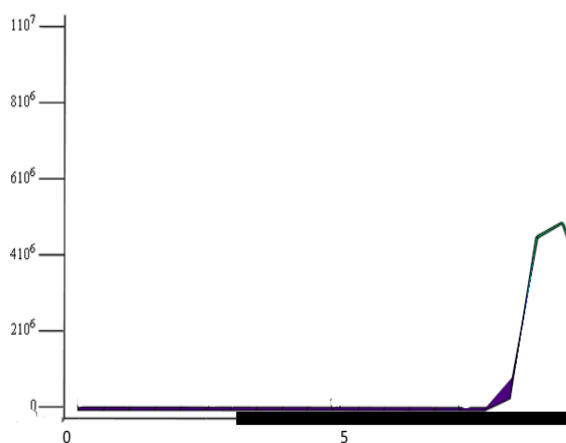


**Рисунок 4 – Приклад розподілу поля напружень в масиві на рівні набійки у фіксований момент часу після одночасного ініціювання двох суміжних свердловинних зарядів (час після ініціювання 0,0025 с)**

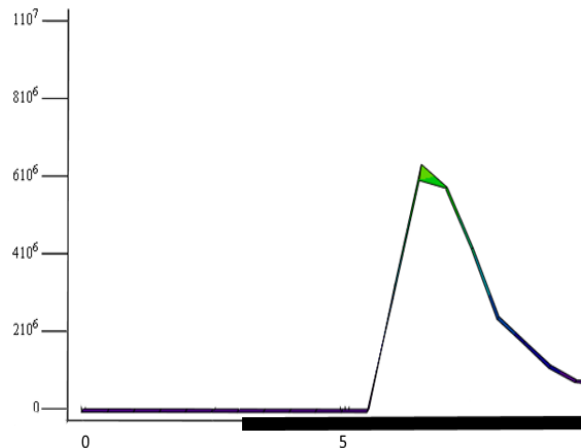
З аналізу і порівняння наведених графіків можна зробити загальний висновок, що внаслідок дисипації енергії вибуху з відстанню від зарядів та взаємодії дисипуючих силових фронтів у центральній частині досліджуваного масиву між свердловинами встановлюється порівняно з міжзарядним ціликом на порядок менше значення сумарного тиску на рівні, позначеному як  $H_1$  на рис. 2. Для підтвердження цього спостереження та більш детального аналізу стану силового поля в центральній частині міжзарядного цілика, рівновіддаленій від осей суміжних зарядів на величину  $a/2$ , побудовано у фіксовані моменти часу діаграми стану сумарного поля напружень на осі

симетрії системи двох суміжних зарядів (рис. 5, а-д). На цих рисунках на осі  $Y$  жирною лінією позначено положення розрахункового подовженого заряду довжиною 10 м. Завдяки такій постановці задачі картина розподілу тиску спрощується, перетворюючись з об'ємної в плоску.

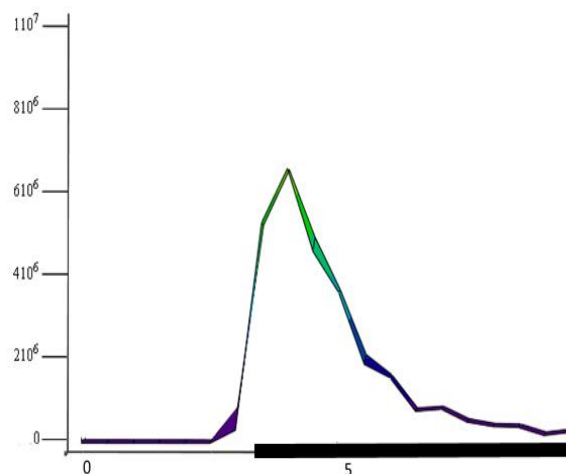
а) Час 0,0075 с



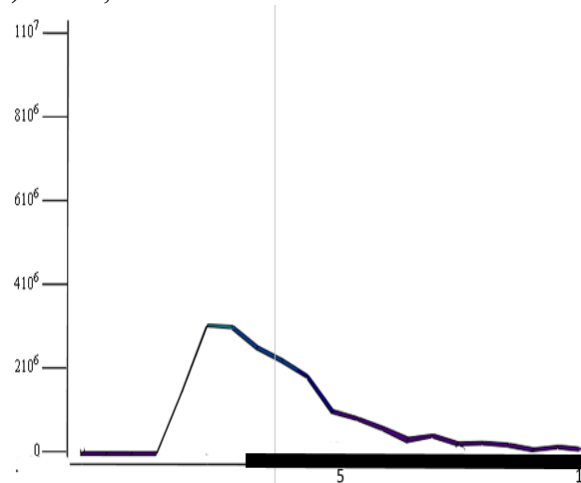
б) Час 0,00125 с



в) Час 0,00175 с



г) Час 0,002 с



**Рисунок 5 – Розподіл напружень в часі вздовж осі симетрії  $S$  в системі суміжних зарядів**

За одночасного нижнього ініціювання суміжних зарядів більший сумарний ефект порівняно з поодиноким зарядом має бути досягнутий в середній зоні між зарядами, оскільки зустрічні фронти хвиль напружень в ідеалі зустрінуться по середній лінії одночасно, якщо не зважати на можливі неоднорідності в масиві, які можуть вплинути на швидкість проходження цих хвиль. Фактично можна в спрощеному варіанті встановити, як по висоті зарядів і набійки розподіляється максимально можливе сумарне значення тиску на відстані  $a/2$  між двома суміжними свердловинними зарядами. Згідно з виконаними розрахунками побудовано зведений графік розподілу максимальних сумарних напружень на серединній осі між суміжними зарядами (рис. 6), починаючи з глибини 10 м, тобто з горизонту закладання нижніх торців суміжних зарядів.

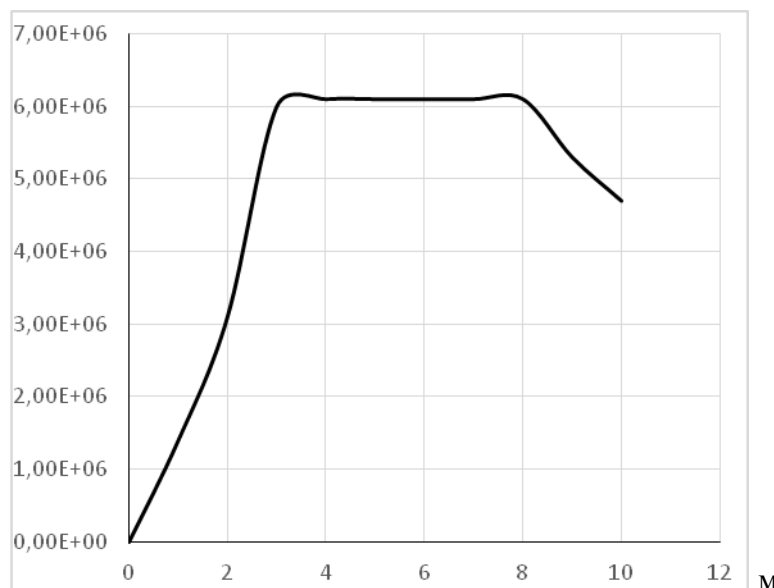


З порівняння епюр напружень на рис. 2 (максимальні напруження на виході з заряду) та на рис. 4 (напруження на серединній осі S-S' в межах площини між зарядами) видно, що руйнуючі напруження в останньому варіанті спадають більше ніж на 2 порядки (від  $2,6 \cdot 10^8$  на межі з зарядом до  $2,6 \cdot 10^6$  на відстані  $a/2$ ), але, як свідчить практика, ще здатні руйнувати гірський масив. Однак особливу увагу слід приділити горизонтам поза межами торців подовженого заряду, тобто над і під кінцями заряду.

З графіка (рис. 6) слідує, що за умови нижнього ініціювання (глибина 10 м без підсилення заряду проміжним ініціатором) одразу поза межами площини зарядів спостерігаються наступні ефекти:

- в межах нижнього торця заряду (горизонт 10...8 м) спостерігається закономірно знижена інтенсивність сумарного силового поля, яку аналогічно даним про моделювання поодинокого подовженого заряду потрібно компенсувати торцевим підсиленням заряду;
- на горизонті 3...0 м, тобто на рівні набійки сумарне силове поле зберігає осьову симетрію завдяки нижньому ініціюванню та одразу за межею площини зарядів інтенсивно різко слабшає і вже на глибині 2 м від поверхні його інтенсивність зменшується вдвічі.

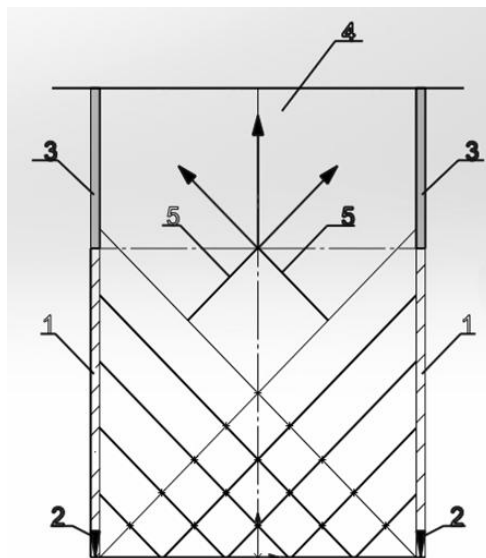
Характерною особливістю залежності на рис. 6 є закономірність формування силового поля в торцях подовженого заряду. І в нижньому, і у верхньому торцях заряду спрацьовує механізм енергетичних втрат, пов'язаний з виродженням симетрії силового фронту.



**Рисунок 6 – Розподіл максимальних сумарних напружень на середній осі симетрії S-S' в системі двох суміжних зарядів**

Ці спостереження співпадають з наведеними раніше даними про суттєвий негативний вплив крайових ефектів вибуху подовженого заряду на формування поля напружень не лише в осьовому напрямку над зарядом, а й на рівні набійки (в середній зоні між зарядами). Логічно припустити, що якість подрібнення масиву в міжзарядній зоні на рівні набійки також погіршується і саме ця зона є одним з джерел виходу негабаритних фракцій. Виходячи з наведених даних, хвильові процеси, як руйнуючий фактор в масиві на рівні набійки, не слід ігнорувати, оскільки вони забезпечують в усьому руйнованому блоці попереднє ослаблення структурних зв'язків, тобто виконують підготовку масиву. Однак, на наш погляд, за основну роботу з руйнування

масиву в межах верхнього торця заряду на рівні набійки в першу чергу відповідає механізм, пов'язаний з процесом формування воронки викидання (спушення) під дією вибуху верхніх торців свердловинних зарядів, та подальший механізм взаємного їх стикання (рис. 7). В зв'язку з цим належить більшу увагу приділити обливостям протікання деформаційних процесів в породному шарі над торцями зарядів.



**Рисунок 7 – Схема взаємодії свердловинних зарядів розпушування в умовах одночасного нижнього ініціювання**

*1 – свердловинний заряд, 2 – проміжний бойовик, 3 – набійка,*

*4 – нейтральний надторцевий шар породи,*

*5 – вектори переміщення взаємодіючих силових і деформаційних фронтів.*

При цьому слід враховувати, що крайові ефекти вибуху і кожного окремого заряду, і сумарні крайові ефекти в міжзарядному просторі підсилюються у верхній частині між зарядної площини завдяки їх нижньому ініціюванню. Застосовуючи потужні конічні бойовики, можна одночасно вирішувати проблему перебуру та генерувати зустрічні (під певним кутом) хвильові фронти, за якими слідують зустрічні масові зрушення.

### ВИСНОВКИ

Представлена картина взаємодії силових полів та масових переміщень в міжзарядному просторі можлива лише за умови одночасного ініціювання суміжних зарядів, що протирічить концепції, закладеній в техніку короткосповільненого підривання. Разом з тим зустрічні зрушення на стадії висхідних масових переміщень в руйнованому міжзарядному об'ємі породи представляються нам новим ефективним елементом технології, що переймає досвід підривання за ефективною системою горизонтального клинового або трапеційного вруба, але дія вруба спрямовується вгору в надторцевий породний шар на рівні набійки. Таким чином, закладається база нової технології ведення масового вибуху укрупненими групами, що складаються з кількох (2-х...3-х) одночасно висаджуваних рядів зарядів. Традиційні періоди мілісекундного сповільнення, потрібні для запобігання надмірного сейсмічного ефекту, встановлюються між цими групами, тобто реалізується комбінована схема КСП «вертикальний клин», в якій можуть бути використані результати вище наведених досліджень.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Орленко, Л.П. (2004) *Физика взрыва*. (Т. 2) М.: ФИЗМАТЛИТ.
2. Kravets, V., Zakusylo, R., Shukurov, A., Han, A., & Turbinski, S. (2019) *Edge effects of limited length downhole charge explosion*. Conference proceedings of 31 th International Conference BLASTING TECHNIQUES 2019. Slovak Society for Blasting and Drilling Works, Banská Bystrica Slovakia, 207–216.
3. Kravets, V., Zakusylo, R., Sydorenko, Y., Shukurov, A., Sałaciński, T., & Zakusylo, D. (2019). Regularities of the Energy of Formation Field in the Explosion of a Conical Charge. *Central European Journal of Energetic Materials*, 16(4), 533–546.
4. Казаков, Н.Н., & Шляпин, А.В. (2015) Разрушение породы камуфлетной и волновой фазами взрыва в верхнем слое карьерного уступа. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 4, 103–123.
5. Казаков, Н.Н. (2013) Параметры процесса камуфлетного действия взрыва скважинного заряда конечной длины. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 1, 109–119.
6. Казаков, Н.Н., & Копылов, С.В. (2003). Уравнение формы волны в породе при взрыве. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 10, 39–40.
7. Лучко, А.І. (2008). Розробка рівнянь стану газоподібних продуктів вибуху еталонних і нових промислових сумішевих вибухових речовин. *Вісник ЖДТУ (Технічні науки)*, 3(46), том 1, 156–161.
8. Лучко, І.А., Ремез, Н.С., & Лучко, А.І. (2011) *Математичне моделювання дії вибуху в ґрунтах і гірських породах*. Київ: НТУУ «КПІ».

## REFERENCES

1. Orlenko, L.P. (2004) *Fizika vzry`va*. (T. 2) M.: FIZMATLIT.
2. Kravets, V., Zakusylo, R., Shukurov, A., Han, A., & Turbinski, S. (2019) *Edge effects of limited length downhole charge explosion*. Conference proceedings of 31 th International Conference BLASTING TECHNIQUES 2019. Slovak Society for Blasting and Drilling Works, Banská Bystrica Slovakia, 207–216.
3. Kravets, V., Zakusylo, R., Sydorenko, Y., Shukurov, A., Sałaciński, T., & Zakusylo, D. (2019). Regularities of the Energy of Formation Field in the Explosion of a Conical Charge. *Central European Journal of Energetic Materials*, 16(4), 533–546.
4. Kazakov, N.N., & Shlyapin, A.V. (2015) *Razrushenie porody` kamufletnoj i volnovej fazami vzry`va v verkhnem sloe kar`ernogo ustupa*. *Gorny`j informaczionno-analiticheskij byulleten`*, 4, 103–123.
5. Kazakov, N.N., & Kopy`lov, S.V. (2003). *Uravenenie formy` volny` v porode pri vzry`ve*. *Gorny`j informaczionno-analiticheskij byulleten`*, 10, 39–40.
6. Luchko, A.I. (2008). *Rozrobka rivnian stanu hazopodibnykh produktiv vybukhu etalonnykh i novykh promyslovykh sumishevykh vybukhovyykh rehovyn*. *Visnyk ZhDTU (Tekhnichni nauky)*, 3(46), tom 1, 156–161.
7. Luchko, I.A., Remez, N.S., & Luchko, A.I. (2011) *Matemaychne modeliuvannia dii vybukhu v hruntakh i hirsykykh porodakh*. Kyiv: NTUU «KPI».

Стаття надійшла 21.04.2020